

Yang Xu, Liu Jing, Wu Xiangbin, Wang Ronglan, Yu Youcheng, Wang Rendong, Zhang Yao, Li Dawei. New method to analyse the orbital abnormality of LEO satellite using TLE data—compositive criterion. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 223-228

利用 TLE 数据分析 LEO 卫星 轨道异常的新方法—综合判据法

杨 旭^{1,2} 刘 静^{1,2} 吴相彬^{1,2} 王荣兰^{1,2}
于友成^{1,2} 王人冬^{1,2} 张 耀^{1,2} 李大卫²

1(中国科学院国家天文台 北京 100012)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 及时准确地发现在轨卫星的轨道异常意义重大. 通过有效的异常算法, 能够找出发生轨道异常的碎片或航天器, 为空间碎片碰撞预警系统分析和验证碰撞事件提供数据支持. 通过对利用 TLE (Two Line Elements) 数据分析 LEO 在轨卫星轨道异常的方法研究, 提出了一个利用单个卫星相邻根数时间差控制加综合判据的判别方法. 分析表明, 相对于取单一因素阈值的判别方法, 综合判据法能够最大限度地减少漏判, 并且保持相对较高的判断准确率.

关键词 轨道异常, LEO 卫星, 两行根数 (TLE)

中图法分类号 V 412

New Method to Analyse the Orbital Abnormal of LEO Satellite Using TLE Data —Compositive Criterion

YANG Xu^{1,2} LIU Jing^{1,2} WU Xiangbin^{1,2} WANG Ronglan^{1,2}
YU Youcheng^{1,2} WANG Rendong^{1,2} ZHANG Yao^{1,2} LI Dawei²

1(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

2(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Finding the orbital abnormal of orbiting satellite accurately and in time has great meanings. The presented method can find the orbital abnormal of debris or spacecraft effectively, which provide data supports to analyse and verify the collision event computed by space debris collision avoidance system. The orbital abnormal also includes the orbit maneuver and other orbit change. This paper discussed how to analyse the orbital abnormal of LEO satellites using TLE data. Then, a method of using the satellite adjacent elements plus compositive criterion are presented. The basic

idea of compositive criterion method is to get each sub criterion and turnover rate using a certain period data of satellites, and each satellite has its own criterion instead of using an settled criterion to all satellites. Analysis showed that compared to using a single element threshold method, the compositive criterion method decreases the missing discrimination and also has a high accuracy of right discrimination. This paper also briefly analyzed other kinds of orbit using the same method.

Key words Orbital Abnormity, LEO satellite, Two Line Elements (TLE)

1 引言

1.1 分析轨道异常的意义

引起在轨卫星轨道异常的原因主要有两种:一种是人为控制的轨道机动;另一种是非人为控制的轨道变化,例如卫星被空间碎片撞击或燃料泄漏等引起的轨道变化.及时准确地发现卫星的轨道异常意义重大,尤其是对于非人为控制的轨道异常,发现异常后可以立即对可能引起异常的因素进行分析.

卫星进行人为的轨道维持等变轨时,轨道形状及轨道倾角变化很小,而如果卫星发生在轨碰撞,一般轨道形状和倾角变化相对较大.所以与轨道偏心率 e 和轨道倾角 i 相关的量可作为验证卫星是否发生在轨碰撞的依据.

1.2 用于判定轨道异常的几个参数

TLE (Two Line Elements, 两行轨道根数数据序列)数据是北美防空司令部发布的空间物体轨道根数,更新快,误差小.如何利用TLE数据有效地判别在轨卫星轨道异常是空间碎片碰撞预警工作研究的内容之一.及时发现轨道异常将有利于掌握在轨卫星的状态,便于分析验证危险交会事件.

根据连续的TLE数据得到不同时刻卫星的轨道数据,进而能够得到不同时刻的卫星轨道根数.相邻时刻的轨道差别是判断轨道异常的依据,可以计算得到以下参量.

$|\Delta a|$: 轨道半长轴变化量绝对值.

$|\Delta a/\Delta t|$: 轨道半长轴变化率绝对值(Δt 为相邻根数时间差).

dn : 轨道平均运动的离散比值^[1].

相邻根数的这三个差别参量是判别卫星轨道异常需要用到的基本参量.前两个有关半长轴参量的意义很明确了. dn 表征的物理意义是,目标最新根数与最近的若干个历史根数相比较,平均运动 n 的偏离

程度. dn 的计算方法是,假设该物体在最近的 m (例如15个)个轨道平均运动值分别为 $n_1, n_2, \dots, n_m$ (按距离时间近到远排列),对相邻的每3个值进行如下计算,有

$$ave_i = \frac{1}{3}(n_i + n_{i+1} + n_{i+2}),$$

$$i = 1, 2, \dots, m-2;$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{3} \left[\left(\frac{n_i}{ave_i} - 1 \right)^2 + \left(\frac{n_{i+1}}{ave_i} - 1 \right)^2 + \left(\frac{n_{i+2}}{ave_i} - 1 \right)^2 \right]},$$

$$i = 1, 2, \dots, m-2;$$

$$\Delta\sigma_j = |\sigma_{i+1} - \sigma_i|, \quad j = 1, 2, \dots, m-3;$$

$$dn_1 = \Delta\sigma_1 / \frac{\sum_{j=1}^{m-3} \Delta\sigma_j}{m-3}.$$

除上述三个量之外,还可以计算得到相邻根数的轨道偏心率变化量 $|\Delta e|$ 、偏心率变化率 $|\Delta e/\Delta t|$ 、倾角变化量 $|\Delta i|$ 、倾角变化率 $|\Delta i/\Delta t|$ 等.这些量在卫星发生碰撞时变化明显,而在其余轨道异常时变化不明显,可以在进行卫星轨道异常分析时作为辅助依据.本文仅针对三个主要量进行研究,判别中未使用这些变化不明显的量.

2 轨道异常判据的分析和确定

如果卫星轨道发生异常,则其对应时刻的相邻根数轨道差别($|\Delta a|$, $|\Delta a/\Delta t|$, dn)会比正常时刻大,这是进行轨道异常判别的基本依据.单独就其中的一个量来判别异常是非常困难的,于是如何综合处理三个量,进而给出准确的判据即成为判别研究的重点.下面分别就三个量单独判别和综合判据法进行分析说明.

2.1 依据三个量之一单独判别轨道异常

对三个异常分量分别确定一系列的阈值, 凡是大于此阈值的数据即判定为异常数据. 下面对所有轨道高度在 600~1000km 的卫星某月 TLE 数据进行分析, 以说明三个分量的应用方法. 其中, 区间误判率是指某阈值区间中被判定为异常的数据中不涉及轨道异常的数据所占比例, 漏判率是指所有轨道异常次数中没有被判定为异常的次数所占比例. 本文中所有对判定结果进行比对的正确结果均为经人工分析判定为异常的结果, 而并非真实的异常结果. 分别用三个分量作为阈值得到的统计结果列于表 1~3. 轨道异常判别工作的目标是找到有效的判据, 在

表 1 所有 600~1000 km 高度卫星异常分析 (以 $|\Delta a|$ 为判据)
Table 1 600~1000 km satellites orbital abnormity (using $|\Delta a|$ criterion)

$ \Delta a $ 阈值 /km	区间误判 率/(%)	漏判率 /(%)	$ \Delta a $ 阈值 /km	区间误判 率/(%)	漏判率 /(%)	$ \Delta a $ 阈值 /km	区间误判 率/(%)	漏判率 /(%)
$> 3 \times 10^{-1}$	8.70	82.67	$9 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	60.38	21.33	$1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$	98.77	0.00
$2 \times 10^{-1} \sim 3 \times 10^{-1}$	58.62	81.33	$8 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3}$	74.39	14.67	$8 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	99.42	0.00
$1 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$	53.70	74.67	$7 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$	76.42	6.67	$6 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}$	99.30	0.00
$8 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	54.55	73.33	$6 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$	87.14	5.33	$4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	99.51	0.00
$6 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$	46.15	70.67	$5 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	92.51	4.00	$2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	99.68	0.00
$4 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$	32.26	68.00	$4 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$	92.91	2.67	$1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$	99.78	0.00
$2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	37.50	56.00	$3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$	95.37	1.33	$< 10^{-4}$	99.69	0.00
$1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	59.68	29.33	$2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$	97.30	1.33			

表 2 所有 600~1000 km 高度卫星异常分析 (以 $|\Delta a/\Delta t|$ 为判据)
Table 2 600~1000 km satellites orbital abnormity (using $|\Delta a/\Delta t|$ criterion)

$ \Delta a/\Delta t $ 阈值/(km·d ⁻¹)	区间误判率/(%)	漏判率/(%)	$ \Delta a/\Delta t $ 阈值/(km·d ⁻¹)	区间误判率/(%)	漏判率/(%)
>1	74.47	84.00	$1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	93.04	16.00
$5 \times 10^{-1} \sim 1$	90.00	78.67	$8 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	95.85	5.33
$1 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-1}$	92.86	69.33	$6 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$	98.93	0.00
$8 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	93.75	68.00	$4 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	100.00	0.00
$6 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$	91.43	64.00	$2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$	100.00	0.00
$4 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$	88.14	54.67	$1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$	100.00	0.00
$2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2}$	97.35	49.33	$< 1 \times 10^{-3}$	100.00	0.00

表 3 所有 600~1000 km 高度卫星异常分析 (以 dn 为判据)
Table 3 600~1000 km satellites orbital abnormity (using dn criterion)

dn 阈值	区间误判率/(%)	漏判率/(%)	dn 阈值	区间误判率/(%)	漏判率/(%)
>20	10.45	54.67	5~6	95.59	4.00
10~20	53.72	21.33	4~5	97.14	4.00
9~10	70.59	14.67	3~4	97.69	4.00
8~9	85.51	13.33	2~3	98.70	4.00
7~8	99.21	9.33	1~2	98.76	0.00
6~7	89.09	8.00	< 1	98.71	0.00

保证漏判率很低的情况下尽量减少误判. 三个异常量的统计结果显示, 要将漏判率降低到 10% 以下, 其区间误判率分别为 76.42%, 95.85% 和 99.21%. 误判数据点的数量远大于判断正确的点数. 也就是说, 如果采用单一判据进行判别, 效果不好.

2.2 综合判据法

为准确判断卫星轨道异常, 提出了利用综合判据判别轨道异常的方法. 每颗卫星所处的轨道环境不同, 数据精度也不同, 所以不同于上述单个判据判别法中对于所有卫星选取统一判据的做法, 综合判据法的基本思想是对每颗卫星选取各自的判据, 利用每颗卫星一段时期内的数据得到一个合理的判据, 用以判断其他时间段的轨道异常. 为了全面考虑 $|\Delta a|$, $|\Delta a/\Delta t|$, dn 的变化, 对三个量均给出正常数据的振幅, 用各自的振幅对三个量进行归一化处理, 然后对每个量分配 1/3 的权重, 用以判别异常. 对于绝大部分的数据点, 综合判据方法是有效的, 但是对于个别由于更新不均匀而导致时间差明显过小或过大的数据会造成误判. 为了避免这类情况, 可以引入相邻根数的时间差控制.

2.2.1 异常判据的选取

对每颗卫星分别选取判据, 具体步骤如下.

步骤 1 选取一段连续时期内的轨道数据作为判据段数据, 一般数据点总数应大于 100 条.

步骤 2 剔除异常的数据. 首先计算判据段数据更新的平均时间差 $\overline{\Delta t}$ (更新率的倒数), 选取时间差 $\Delta t \in [\overline{\Delta t}/3, 3\overline{\Delta t}]$ 的数据作为判据数据, 忽略其余数据, 具体原因将在下文进行说明. 然后判别此数据段内是否有变轨或异常数据点出现, 忽略这些涉及异常的数据, 选取正常的轨道数据作为判据标准段. 用

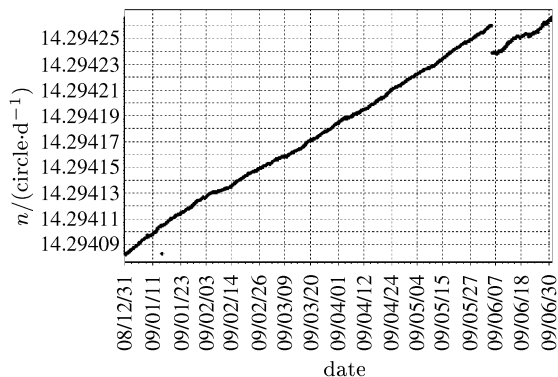


图 1 某卫星一段时期内的平均运动曲线

Fig. 1 Mean motion of a satellite in a certain period

轨道的平均运动图即可实现对判据段的异常点判断. 图 1 为某卫星一段时期内的平均运动曲线, 其中横坐标为数据时刻, 纵坐标为轨道平均运动 n (单位: circle/d). 此段数据在 2009 年 1 月中旬有一个明显的异常数据点, 在 2009 年 6 月上旬有一次变轨, 作为判据标准段应该删除这些异常数据点.

步骤 3 假设经过时间差筛选和异常剔除, 最终获得 m 组数据能够作为轨道异常判据标准段的数据. 令三个分阈值 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为判据标准段内所有数据 $|\Delta a|, |\Delta a/\Delta t|, dn$ 的最大值, 即

$$\begin{cases} \delta_1 = \max[|\Delta a|_j], & j = 1, 2, \dots, m; \\ \delta_2 = \max\left[\left|\frac{\Delta a}{\Delta t}\right|_j\right], & j = 1, 2, \dots, m; \\ \delta_3 = \max[dn|_j], & j = 1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

2.2.2 异常判别

计算得出了三个分阈值后, 即可对卫星轨道进行异常判别. 对于第 i 个数据点, 其综合判据

$$\delta_i = \left(\frac{|\Delta a|_i}{\delta_1} + \frac{\left|\frac{\Delta a}{\Delta t}\right|_i}{\delta_2} + \frac{dn_i}{\delta_3} \right) / 3.$$

如前所述, 为避免由于数据更新不均匀导致的误判, 进行异常判别时还要加入时间差控制.

对于绝大多数 $\Delta t \in [\overline{\Delta t}/3, 3\overline{\Delta t}]$ 的数据, 采用综合判据进行判别, 异常阈值为 1. 对于 $\Delta t > 3\overline{\Delta t}$ 且时间差过大的数据, 不再采用综合判据, 而采用能够有效鉴别此类数据的 $|\Delta a/\Delta t|$ 分判据 δ_2 作为判别标准, 即如果某条时间差过大的数据 $|\Delta a/\Delta t|$ 值大于分判据 δ_2 , 则判定其为异常数据, 反之则判定为正常. 同理, 对于 $\Delta t < \overline{\Delta t}/3$ 的时间差过小的数据, 以 $|\Delta a|$ 分判据 δ_1 作为判别标准, 即如果某条时间差过小的数据 $|\Delta a|$ 值大于分判据 δ_1 , 则判定其为异常数据, 反之则判定为正常数据. 综上所述, 判别方法可表示为:

$\Delta t < \overline{\Delta t}/3$, 用 $|\Delta a|$ 分量进行判别, 异常阈值为 δ_1 ;

$\Delta t \in [\overline{\Delta t}/3, 3\overline{\Delta t}]$, 用综合判据 δ 进行判别, 异常阈值为 1;

$\Delta t > 3\overline{\Delta t}$, 用 $\left|\frac{\Delta a}{\Delta t}\right|$ 分量进行判别, 异常阈值为 δ_2 .

时间差控制中的判别方法和上下界的选取及原因如下.

①对于 $\Delta t > 3\overline{\Delta t}$ 的时间差过大的数据, 其 $|\Delta a|$ 分量的累积量超过正常值的三倍, 考虑到 $|\Delta a|$

分判据在综合判据中的权重为 $1/3$, 其对总判据的影响超过 1. 此时用半长轴变化率绝对值 $|\Delta a/\Delta t|$ 能够很好地进行异常判别.

②同理对于 $\Delta t < \overline{\Delta t}/3$ 的时间差过小的数据, 其 $|\Delta a/\Delta t|$ 的累积量超过正常值的三倍, $|\Delta a/\Delta t|$ 分判据的权重也为 $1/3$, 其对总判据的影响超过 1. 此时用半长轴变化量绝对值 $|\Delta a|$ 能够很好的进行异常判别. 这两个时间差上下界也正是上文在处理判据段时只选用 $\Delta t \in [\overline{\Delta t}/3, 3\overline{\Delta t}]$ 的数据作为判据数据的原因.

3 在轨异常判别实例分析

3.1 LEO 卫星轨道异常分析

运用时间差控制加综合判据的方法对 16 颗 LEO (近地轨道) 在轨卫星在 2007 年 1 月 1 日至 2009 年 6 月 30 日期间 (部分发射日期晚于 2007 年 1 月 1 日的卫星, 从发射入轨开始至 2009 年 6 月 30 日) 的 TLE 数据进行轨道异常分析. 16 颗卫星的异常分析结果统计如下: 总数据量为 26980 条, 异常数

据 528 条 (异常率 1.96%), 误判 65 条, 总判别准确率 88%. 所有的变轨和明显的异常值均被判别出来, 漏判率为 0. 其中部分卫星的判别结果列于表 4.

研究结果显示, 用时间差控制加综合判据法判别 LEO 卫星轨道异常能够最大限度地减少漏判, 并且维持很高的判别准确率. 被判别为异常的数据多为变轨点或明显的异常数据. 对于具体的卫星而言, 只要获取了足够量的连续数据作为异常判据段, 则可计算得到相应的三个异常分量阈值, 进而对最新更新的数据进行异常判别, 及时发现轨道异常.

3.2 铱星 33 和宇宙 2251 碰撞分析

将在轨异常综合判据法用于判断和验证碰撞事件也很有效, 以 2009 年 2 月 10 日发生的美俄卫星碰撞事件为例^[2], 用综合判据法对此次碰撞后的两颗卫星 (母体) 铱星 33 和宇宙 2251 最新轨道数据进行分析, 结果列于表 5. 数据显示, 发生碰撞后的卫星 (母体) 轨道急剧变化, 三个轨道异常分量的变化都比阈值高了三个量级左右, 综合判据也比阈值 1 高出 3 个量级, 由综合判据法可以非常明确地判断出两卫星的轨道均发生了巨大的异常变化.

表 4 部分卫星异常判别结果
Table 4 Part of the results using compositive criterion

序号	编号	$\overline{\Delta t}/\text{d}$	δ_1/km	$\delta_2/(\text{km}\cdot\text{d}^{-1})$	δ_3	数据总数/条	异常数据/条	误判/条	准确率/(%)	漏判率
1	28413	0.302	0.006	0.01803	5.88	2813	12	1	92	0
2	28414	0.295	0.005	0.01322	6.71	2833	3	3	0	0
3	28479	0.298	0.002	0.01490	5.67	2817	19	3	84	0
4	29505	0.291	0.006	0.01322	9.98	2872	12	3	75	0
5	29506	0.294	0.003	0.01135	13.02	2842	18	4	77	0
6	31113	0.302	0.001	0.00414	6.30	2340	66	6	91	0
7	31490	0.290	0.002	0.01286	5.42	2361	53	1	98	0
8	32062	0.298	0.001	0.00466	4.55	1873	130	19	85	0

表 5 铱星 33 和宇宙 2251 碰撞后的最新 TLE 数据分析
Table 5 Analysis of the orbital elements of Iridium 33 and Cosmos 2251 after collision

名称	历元时刻 /UTC	$ \Delta a /\text{km}$	δ_1/km	$ \Delta a/\Delta t /(\text{km}\cdot\text{d}^{-1})$	$\delta_2/(\text{km}\cdot\text{d}^{-1})$	d_n	δ_3	综合判据 δ	异常 阈值	是否 异常
IRIDIUM 33	2009-02-12 03:48:05	5.796	0.002	4.148	0.00720	12264.62	7.77	1684.216	1	是
COSMOS 2251	2009-02-12 02:00:40	3.042	0.002	2.292	0.00239	17903.02	7.75	1596.955	1	是

4 结论

以上实例分析表明, 利用综合判据法判别 LEO 卫星轨道异常能够基本消除漏判, 并且保持较高的判断准确率. 综合判据法对于在轨碰撞事件的验证也是有效的.

由于在轨卫星的轨道环境会发生缓慢变化, 数据质量在不同时间段内也可能有所差别, 所以在应用此方法长时间进行判别时, 应该随时间的推移在适当的时间长度 (例如半年) 后对分阈值进行更新.

本文的分析主要是针对 LEO 轨道. 对其他类型的轨道, 简要分析后也有一些初步结论. MEO (中高度地球轨道) 轨道的数据质量很好, 轨道稳定, 用综合判据法能够很好地判定异常. 而 GEO (地球同步轨道) 和大椭圆轨道数据精度较低, 尤其是 GEO 卫星轨道维持机动很频繁, 综合判据法的适用性需要进一步统计分析.

综合判据法的基本思想是利用卫星在一段时期

内的数据得到平均更新时间差和分判据, 进而判断其余时间的轨道异常, 连续的数据资料是判据段数据选取所必须具备的条件. 用此类方法进行在轨卫星轨道异常判别, 需要良好的数据基础. 高质量的数据库建设对轨道异常分析意义重大.

参考文献

- [1] Zhu Jianfeng, Wu Xiangbin, Liu Jing. An analysis arithmetic of orbital abnormality based on average angular velocity [R]//Twelfth National Solar-Terrestrial Space Physics Conference 2007. In Chinese (朱建峰, 吴相彬, 刘静. 基于平均角速度的轨道异常分析算法 [R]. 第十二届全国日地空间物理学术讨论会, 2007)
- [2] Liu Jing, Wu Xiangbin, Wang Rendong, Wang Ronglan, Cheng Haowen. Analysis of iridium 33-cosmos 2251 collision event and debris using TLE data [G]//The Fifth National Space Debris Conference Proceeding 2009. In Chinese (刘静, 吴相彬, 王人冬, 王荣兰, 程昊文. 利用 TLE 数据分析美俄卫星碰撞事件及其碎片 [G]//第五届全国空间碎片专题研讨会论文集, 2009)